Iranian Journal of Field Crops Research
Vol. 18, No. 2, Summer. 2020, p. 139-151

نشریه پژوهشهای زراعی ایران
جلد ۱۸، شماره ۲، تابستان ۱۳۹۹، ص. ۱۵۱-۱۳۹

مقاله علمی-پژوهشی

اثر نیتروژن و تنش کم‌آبی بر خصوصیات ریشه و عملکرد دانه ذرت رقم (SC. 704)

روح الله سرورزاده[۱]، حمیدرضا خزاعی[۲*]، احمد نظامی[۲]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۹/۰۵
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۲/۰۵

چکیده

به‌منظور تعیین اثر نیتروژن و تنش کم‌آبی بر خصوصیات ریشه و عملکرد دانه ذرت رقم (SC. 704)، آزمایشی طی سال زراعی ۱۳۹۴ در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد انجام شد. نیتروژن در دو سطح (۱۰۰ و ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار از منبع اوره) و آبیاری در شش سطح (آبیاری کامل، تنش متوسط کم‌آبی در مرحله ۴ تا ۶ برگی، تنش شدید کم‌آبی در مرحله ۴ تا ۶ برگی، تنش متوسط کم‌آبی در مرحله ۴ تا ۶ برگی و ادامه آبیاری با کم‌آبیاری، تنش شدید کم‌آبی در مرحله ۴ تا ۶ برگی و ادامه آبیاری با کم‌آبیاری، کم‌آبیاری بعد از مرحله ۶ برگی) بر روی گیاهان اعمال شد. برای اعمال تنش متوسط ۵۵، برای تنش شدید ۴۵ و برای اعمال کم آبیاری ۶۵ درصد رطوبت ظرفیت زراعی در نظر گرفته شد و آبیاری بعد از رسیدن رطوبت خاک در عمق توسعه ریشه به مقادیر ذکر شده انجام شد. نتایج نشان داد که آبیاری مجدد به همراه کود سرک نیتروژن منجر به تسریع بیشتر رشد گیاهانی شد که در شرایط تنش شدید کم‌آبی و کمبود نیتروژن قرار گرفته بودند. اندازه‌گیری‌ها در مرحله کاکل‌دهی ذرت نشان داد اثر نیتروژن و آبیاری بر شاخص کلروفیل، شاخص سطح برگ، تعداد ریشه‌های هوایی، عملکرد، کارایی زراعی مصرف نیتروژن و کارایی جذب نیتروژن در ($P\leq0.05$) معنی‌دار شد، ضمن این‌که اثر نیتروژن بر تعداد و زوایای ریشه‌های طوقه‌ای، تعداد ریشه‌های جانبی در ریشه‌های طوقه‌ای در ($P\leq0.05$) معنی‌دار بود. با وجودی‌که بیشترین عملکرد با مصرف ۲۰۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار و آبیاری کامل به مقدار ۱۱۶۴۰ کیلوگرم در هکتار و کمترین عملکرد با مصرف نیتروژن به مقدار ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار و تنش شدید کم آبی در مرحله ۴ تا ۶ برگی و کم آبیاری متعاقب آن به مقدار ۶۴۹۰ کیلوگرم در هکتار به‌دست آمد، کاهش عملکرد در تنش متوسط کم‌آبی در مرحله رویشی معادل ۱۱ درصد بود که نشان‌دهنده مقاومت نسبی گیاه ذرت در این مرحله به تنش کم‌آبی و سازگاری در شاخساره و ریشه‌ها برای تعدیل اثر تنش کم‌آبی در شرایط این آزمایش است.

واژه‌های کلیدی: ریشه‌های طوقه‌ای، ریشه‌های هوایی، کارایی زراعی مصرف نیتروژن

مقدمه

در سال‌های اخیر، روش کم‌آبیاری تنظیم شده[۳]، به‌عنوان بخشی از عملیات صرفه‌جویی در مصرف آب به شکل گسترده‌ای در گیاهان زراعی، سبزیجات و تولید میوه‌جات مورد استفاده قرار گرفته است (Jensen *et al*., 2014; Intrigliolo *et al*., 2013; Balester, *et al*., 2013). کم‌آبیاری[۴]، به‌عنوان مصرف آب کمتر از نیاز آبی گیاه گفته می‌شود، مبنای تئوری مزایای کم‌آبیاری تنظیم شده و کم‌آبیاری این است که گیاهان می‌توانند بعد از آبیاری مجدد، رشد خود را جبران کنند (Ferreres and Soriano, 2007). بعضی از محققان گزارش کردند کاهش رشد ناشی از تنش خشکی به خاطر رشد سریع در شرایط فراهمی آب، جبران شده و یا تسریع می‌شود (Wang *et al*., 2016). به خاطر کمبود آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک و همزمانی رشد ذرت (*Zea mays* L.) با محصولات تابستانه، تامین آب در زراعت ذرت با مشکلاتی همراه می‌شود که در مواقعی باعث ایجاد تنش کم‌آبی برای ذرت می‌گردد (Pandey *et al*., 2000).

محققان برای کاهش مصرف آب در زراعت ذرت، حذف آبیاری در مرحله رویشی به‌عنوان مرحله‌ای از رشد گیاه که مقاومت نسبی به کم‌آبی دارد با پذیرش افت عملکرد را پیشنهاد کردند (Rabbani and Emam, 2011). آنها اظهار داشتند تنش خشکی در همه مراحل رشد ذرت کاهش عملکرد دانه را به دنبال دارد، لیکن در شرایط کمبود آب می‌توان با پذیرش افت اندکی در عملکرد دانه، آبیاری در مرحله رویشی را حذف و به سایر گیاهان زراعی اختصاص داد. پژوهشگران اظهار داشتند اعمال تنش کم‌آبی در مرحله رویشی تفاوت معنی‌داری با آبیاری کامل ندارد اما کاهش ۲۰ درصدی در عملکرد دانه به خاطر تنش در مرحله زایشی در ارقام میان‌رس ذرت مشاهده می‌شود (Mansoori-Far *et al*., 2010). نتایج سایر محققان نشان می‌دهد تنش رطوبت در قبل، زمان گلدهی و بعد از آن، عملکرد ذرت را به‌ترتیب ۲۵، ۵۰ و ۲۱ درصد کاهش می‌دهد (Osborne *et al*., 2002). تفاوت در نتایج ذکر شده ممکن است به دلیل تفاوت در زمان و شدت اعمال تنش کم‌آبی باشد.

در شرایط تنش ملایم تا متوسط، کم‌آبی از توسعه سلولی ممانعت به عمل آورده و این امر منجر به کاهش توسعه سطح برگ و به‌دنبال

۱- دانشجوی دکتری فیزیولوژی گیاهان زراعی، دانشگاه فردوسی مشهد
۲- استاد، گروه اگروتکنولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد
(*- نویسنده مسئول: Email: h.khazaie@um.ac.ir)
DOI: 10.22067/gsc.v18i2.68988
3- Regulated deficit irrigation
4- Deficit Irrigation

آن کاهش رشد کاکل‌های بلال، کاهش طویل شدن ساقه و بالاخره با افزایش شدت تنش، باعث کاهش رشد ریشه می‌شود. به‌علاوه تنش شدید خشکی، از تقسیم سلولی ممانعت به‌عمل آورده و حتی با کاهش تنش نیز بافت‌های متاثر شده دیگر دارای توسعه کامل سلول نخواهند بود (Bänziger *et al.*, 2000).

نیتروژن در ساختار پروتئین‌ها و آنزیم‌ها نقش اساسی دارد و آنزیم رابیسکو بیش از ۵۰ درصد از پروتئین‌های برگ را تشکیل می‌دهد (Cheng and Fuchigami, 2000). استفاده از نیتروژن منجر به افزایش عملکرد دانه ذرت می‌شود که به‌خاطر افزایش انتقال مواد فتوسنتزی از برگ‌ها به بلال در حال نمو می‌باشد (Peng *et al.*, 2014). در عین حال،کمبود نیتروژن باعث کاهش رشد و عملکرد دانه ذرت می‌گردد اما کارایی مصرف نیتروژن با افزایش مصرف نیتروژن کاهش می‌یابد (Ciampitti and Vyn, 2011; Peng *et al.*, 2012).

توانایی گیاه در جذب آب و عناصر غذایی به خصوصیات ریشه مربوط است. ریشه ذرت شامل ریشه جنینی (از ریشه اولیه یا ریشه‌چه، و ریشه‌های بذری تشکیل می‌شود) و سیستم ریشه بعد از جنینی[1] (ریشه‌های طوقه‌ای[2] و ریشه‌های هوایی[3]) می‌باشد. ریشه‌های طوقه‌ای در زیر سطح زمین شکل می‌گیرند و ریشه‌های هوایی از گره‌های ساقه در بالای سطح خاک منشاء می‌گیرند. ریشه‌های اولیه، بذری، طوقه‌ای و هوایی به‌عنوان ریشه‌های محوری[4] نیز شناخته می‌شوند در حالی‌که ریشه‌های که از آن‌ها منشاء می‌گیرند ریشه‌های جانبی[5] خوانده می‌شوند (Hochholdinger and Tuberosa, 2009).

محققان مختلف توانایی گیاه در تغییر فرآیندهای بیوشیمیایی و فیزیولوژیکی ریشه را مکانیسم مهمی در مقاومت به خشکی دانسته‌اند. گزارش شده است که نخود (*Cicer arietinum* L.) می‌تواند توزیع ریشه را در خاک که در نتیجه تنش کم‌آبی حادث می‌شود، تغییر داده و در نتیجه از اعماق بیشتر، آب را استخراج کند (Benjamin and Nielsen, 2014). نسبت ریشه به اندام هوایی گیاهان در شرایط کمبود آب افزایش می‌یابد (Noctor *et al.*, 2002). گیاهچه‌های ذرت به پتانسیل کم آب خاک با افزایش انعطاف‌پذیری دیواره‌های سلولی در قسمت انتهایی ریشه سازگاری پیدا می‌کنند (Wu and Cosgrove, 2000). بعد از شروع خشکی، طبیعتاً آب در لایه‌های عمیق‌تر خاک یافت می‌شود. نتایج تحقیقات نشان می‌دهد که دما در ذرت (Nagel *et al.*, 2009) و دسترسی به فسفر در لوبیا (*Phaseous vulgaris* L.) (Liao *et al.*, 2001) بر زوایای ریشه تاثیر می‌گذارند. در عین این‌که برهمکنشی با نور، اسیدیته، آب و نیترات وجود دارد، برهمکنش با اکسین نیز محتمل است (Vidal *et al.*, 2010). بعضی از پاسخ‌های مورفولوژیکی ریشه‌های ذرت به تنش کمی نیتروژن مشخص شده است. به‌عنوان مثال، تنش کمی نیتروژن باعث افزایش طول ریشه می‌گردد (Gaudin *et al.*, 2011).

با توجه به اهمیت عنصر پرمصرف نیتروژن در تولید ذرت و اهمیت آبیاری در کشت محصولات تابستانه، تعیین عکس‌العمل گیاه ذرت به تنش کم‌آبی و مقدار مصرف عنصر نیتروژن از اهمیت خاصی برخوردار است. ضمن این‌که درک نحوه رشد جبرانی بعد از آبیاری مجدد در گیاهانی که با تنش کم‌آبی مواجه می‌شوند و عوامل موثر بر آن، اطلاعات مفیدی برای سیستم کشاورزی که به دنبال حفظ و ذخیره آب است، فراهم می‌کند. این مطالعه به منظور بررسی تغییرات مورفولوژی در ریشه و تاثیر آن بر عملکرد ذرت در شرایط تنش کم‌آبی و تاثیر سطوح مصرف نیتروژن اجرا شد.

مواد و روش‌ها

این آزمایش در سال ۱۳۹۴ در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد واقع در ۱۰ کیلومتری شرق مشهد با طول جغرافیایی ′۲۸ °۵۹ شرقی و عرض جغرافیایی ′۱۵ °۳۶ شمالی و ارتفاع ۹۸۵ متر از سطح دریا اجرا شد. متوسط بارندگی منطقه ۲۸۶ میلی‌متر و کمینه و بیشینه دمای مطلق سالانه به‌ترتیب ۲۷/۸– و ۴۲ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. برخی از خصوصیات خاک مزرعه در جدول ۱ آمده است.

عوامل آزمایش شامل شش سطح آبیاری و دو سطح مصرف نیتروژن بود، که به‌صورت فاکتوریل در سه تکرار و در قالب طرح بلوک کامل تصادفی در مزرعه اجرا شد. هر کرت شامل چهار ردیف به فاصله ۷۵ سانتی‌متر بود و شش متر طول داشت. فاصله دو متری بین کرت‌ها برای جلوگیری از نفوذ آب و کود در نظر گرفته شد. از ذرت دانه‌ای رقم سینگل کراس ۷۰۴ استفاده شد. سطوح آبیاری به صورت: آبیاری کامل (W1)، تنش متوسط کم‌آبی در مرحله ۴ تا ۶ برگی (W2)، تنش شدید کم‌آبی در مرحله ۴ تا ۶ برگی (W3)، تنش متوسط کم‌آبی در مرحله ۴ تا ۶ برگی و ادامه آبیاری با کم‌آبیاری (W4)، تنش شدید کم‌آبی در مرحله ۴ تا ۶ برگی و ادامه آبیاری با کم‌آبیاری (W5) و آبیاری کامل تا مرحله ۴ تا ۶ برگی و ادامه آبیاری به‌صورت کم‌آبیاری (W6) اجرا شد.

برای تنش متوسط کم‌آبی قطع آبیاری تا رسیدن رطوبت خاک به ۵۵ درصد FC و برای تنش شدید کم‌آبی قطع آبیاری تا رسیدن رطوبت خاک به ۴۵ درصد FC در نظر گرفته شد، ضمن این‌که برای کم‌آبیاری ۶۵ درصد FC لحاظ شد. مقدار ۵۵ درصد رطوبت ظرفیت

1- Post embryonic roots
2- Crown roots
3- Brace roots
4- Axile roots
5- Lateral roots

زراعی خاک نشان‌دهنده تنش کم‌آبی و ۷۵ درصد ظرفیت زراعی خاک در منابع حد آبیاری کامل عنوان شده است (Wang *et al.*, 2016).

جدول ۱- برخی مشخصات خاک محل آزمایش (عمق ۰ تا ٦٠ سانتی‌متر)

Table 1- Selected properties of experiment site' soil (0-60 cm depth)

هدایت الکتریکی EC (µS .cm^{-1})	اسیدیته pH	کربن آلی Organic Carbon %	فسفر قابل جذب Phosphorus (ppm)	پتاسیم قابل جذب Potassium (ppm)	نیتروژن Nitrogen (kg ha^{-1})	سیلت Silt %	شن Sand %	رس Clay %
885	7.65	0.61	32	225	49.3	51.5	24.1	24.3

برای تعیین آب مورد نیاز در هر بار آبیاری، از روش تعیین رطوبت وزنی خاک استفاده گردید، به این منظور، ۲۴ ساعت پیش از هر آبیاری، بسته به عمق توسعه ریشه در مرحله رشدی ذرت (۰-۳۰، ۳۰-۶۰) نمونه‌برداری شد و پس از خشکاندن در آون، میزان رطوبت وزنی خاک تعیین گردید. بر این اساس، میزان آب مورد نیاز برای آبیاری تا رسیدن به رطوبت خاک به حد گنجایش زراعی محاسبه گردید. میزان آب مورد نیاز در هر بار آبیاری، با استفاده از معادله (۱) تعیین شد.

$$dn = \frac{(FC - \theta m) \times \rho b \times D}{100} \qquad (۱)$$

که dn عمق آب مورد نیاز برای آبیاری، FC حد گنجایش زراعی خاک محل مورد آزمایش بر حسب درصد وزنی، θm رطوبت وزنی خاک، ρb چگالی ظاهری خاک و D عمق نمونه‌برداری از خاک است (Rabbani and Emam., 2011). آب آبیاری با استفاده از لوله‌های پلی‌اتیلن به کرت‌ها هدایت شد و حجم آن با استفاده از کنتور اندازه‌گیری گردید. گیاهان تا قبل از مرحله چهار برگی به شکل یکسان آبیاری شدند. سطوح مصرف نیتروژن بر اساس آزمایش خاک و توصیه کودی (۲۰۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن از منبع اوره) و ۵۰٪ آن بود که در ۴ مرحله (پایه، مرحله ۶ برگی، ۱۲ برگی و کاکل‌دهی) به خاک اضافه شد. سایر عناصر غذایی مورد نیاز ذرت بر اساس آزمایش خاک و توصیه کودی مصرف شد. کاشت در تاریخ ۱۰ خرداد انجام گرفت و برداشت در تاریخ ۲۰ مهر صورت پذیرفت. کاشت بذرها با دست در عمق پنج سانتی‌متری به فاصله ۱۸ سانتی متر از هم روی ردیف‌ها انجام شد و تراکم ۷۴۰۰۰ بوته در هکتار در نظر گرفته شد. تعیین مراحل فنولوژیک با رسیدن ۵۰ درصد بوته‌ها به مرحله مورد نظر صورت گرفت. دو ردیف کناری از هر کرت به‌عنوان حاشیه محسوب و دو ردیف وسط پس از حذف ۰/۵ متر از بالا و پایین ردیف‌ها جهت نمونه‌برداری در طول فصل رشد استفاده شد.

سرعت رشد محصول با اندازه‌گیری وزن خشک شاخساره در زمان رفع تنش کم‌آبی و ۱۰ روز بعد از رفع تنش کم‌آبی با قطع بوته‌ها از سطح خاک و خشک‌کردن آنها انجام شد. سپس با در نظر داشت فاصله بین دو نمونه‌گیری سرعت رشد محصول با استفاده از معادله (۲) محاسبه شد.

$$CGR = \frac{W2 - W1}{t2 - t1} \qquad (۲)$$

که در آن W وزن خشک گیاه، t زمان انجام نمونه‌برداری و CGR سرعت رشد محصول بر اساس گرم در مترمربع بر روز است (Koocheki and Sarmadnia, 1998).

فنوتیپ ریشه بر اساس روش شاولومیکس[1] ارزیابی شد (Trachsel *et al.*, 2011). به این منظور پنج بوته در هر کرت بر اساس ارتفاع و ظاهرکلی به شکلی که نمایانگر گیاهان آن کرت بودند با رعایت اثر حاشیه و از وسط کرت برای خارج کردن ریشه‌ها انتخاب شدند. ریشه‌های طوقه‌ای پنج بوته در هر کرت جمع‌آوری شدند و میانگین آن‌ها به‌صورت خصوصیات یک بوته ثبت شد. در زمان کاکل‌دهی ذرت، با خارج کردن استوانه‌ای از خاک به شعاع ۴۰ سانتی‌متر و عمق ۲۵ سانتی‌متربا مرکزیت قاعده گیاه در مرکز افقی استوانه خاک، ریشه‌ها بیرون آورده شدند. طوقه‌های خارج شده به‌آرامی لرزانده شدند تا بخش عمده خاکی که به ریشه‌های طوقه‌ای چسبیده بود، جدا شود.

باقیمانده خاک با غوطه‌ور ساختن و لرزاندن ریشه‌های طوقه‌ای در شوینده ملایم با غلظت ۰/۵٪ (شامل سدیم لورت سولفات، کوکومیدوفورل بتائین، کوکامید، استرین اکریلات کوپولیمر، کلروهیگزیدین گلوکونات و سدیم کلراید) جداسازی شد (Trashsel *et al.*, 2013). در گام سوم، باقیمانده ذرات خاک از ریشه طوقه‌ای با آبشویی در فشار کم جدا شد. در ادامه ریشه‌های تمیز برای اندازه‌گیری خصوصیات تعداد ریشه‌های طوقه‌ای و ریشه‌های هوایی شمارش شدند، نقاله بزرگ برای اندازه‌گیری زوایای ریشه‌های طوقه‌ای و هوایی بر حسب درجه از حالت افقی، مورد استفاده قرار گرفت. به این صورت که زاویه ریشه‌های افقی فرضی به‌عنوان صفر و ریشه‌های عمودی ۹۰ درجه تقسیم‌بندی شدند. زوایای هفت عدد ریشه طوقه‌ای و هوایی در هر بوته اندازه‌گیری شد و مقدار میانگین

1- Shovelomix

برای هر بوته ثبت شد. انشعابات ریشه‌های طوقه‌ای (ریشه‌های جانبی) در یک قطعه به طول یک سانتی‌متر با فاصله پنج سانتی‌متری از قاعده شمارش شد، اندازه‌گیری برای هفت ریشه طوقه‌ای در هر بوته تکرار شد (Trachsel *et al*., 2011). همه ریشه‌هایی که از زیر خاک ظاهر شدند به‌عنوان ریشه طوقه‌ای و ریشه‌هایی که از بالای سطح خاک بیرون آمده بودند به‌عنوان ریشه هوایی در نظر گرفته شدند (Trachsel *et al*., 2013). شاخص کلروفیل (عدد اسپاد) با استفاده از کلروفیل‌متر دستی (SPAD-502 Konica Minolta) در مرحله کاکل‌دهی قرائت شد. در هر کرت از برگ‌های میانی ۱۰ بوته وسطی کرت مجموعاً ۳۰ قرائت انجام شد و میانگین آن‌ها به‌عنوان شاخص کلروفیل آن کرت ثبت شد.

به‌منظور تعیین عملکرد نهایی، در مرحلهٔ رسیدگی کامل از دو ردیف میانی هر کرت آزمایشی پس از حذف ۰/۵ متر از بالا و پایین ردیف‌ها، دو مترمربع برداشت شده و عملکرد دانه اندازه‌گیری و محاسبه شد. مقدار نیتروژن ساقه، برگ، ریشه و دانه در اندازه‌گیری مربوطه با استفاده از روش کجلدال (Feil *et al*., 2005) تعیین شد. کارایی زراعی مصرف نیتروژن و کارایی جذب نیتروژن با استفاده از معادلات سه و چهار محاسبه شد (Moll *et al*., 1982).

$$\text{کارایی زراعی مصرف نیتروژن} = \frac{\text{عملکرد دانه در تیمار کودی}}{\text{مقدار کود نیتروژن مصرف شده}} \times 100 \qquad (۳)$$

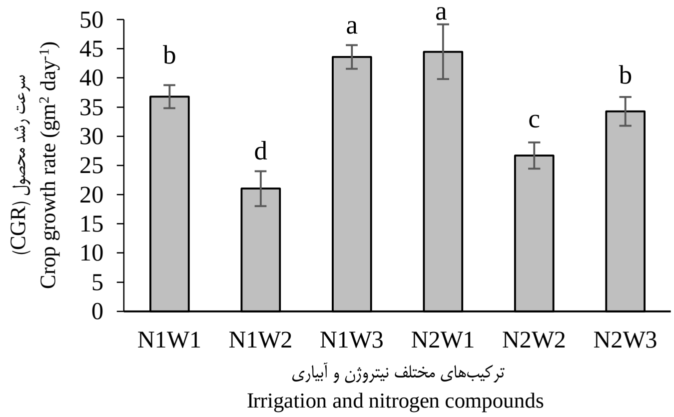
$$\text{کارایی جذب نیتروژن} = \frac{\text{نیتروژن جذب شده در تیمار کودی}}{\text{مقدار کود نیتروژن مصرف شده}} \times 100 \qquad (۴)$$

برای تجزیه آماری داده‌ها از نرم‌افزار SAS 9.2 استفاده شد و در صورت معنی‌دار شدن اثرات اصلی و متقابل، مقایسه میانگین‌ها با آزمون چند دامنه‌ای دانکن، صورت گرفت. برای رسم شکل‌ها از نرم‌افزار Excel 2013 استفاده شد.

نتایج و بحث

سرعت رشد محصول (CGR) در زمان رفع تنش و ۱۰ روز بعد از آن

نتیجه تجزیه واریانس در مورد سرعت رشد محصول نشان داد که اثر آبیاری و اثر متقابل نیتروژن و آبیاری در سطح یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۲). مقایسه میانگین اثر متقابل نیتروژن و آبیاری در مورد سرعت رشد محصول (شکل ۱) نشان داد که بیشترین مقدار این شاخص با مصرف ۲۰۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار و آبیاری کامل به‌دست آمد که اختلاف معنی‌داری با مصرف ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن و تنش شدید کم‌آبی در مرحله رویشی نداشت. کمترین مقدار نیز مربوط به هر دو سطح مصرف نیتروژن و تنش متوسط کم‌آبی بود. گیاهانی که دچار کمبود نیتروژن و تنش کم‌آبی بودند پس از رفع تنش سرعت رشدی معادل گیاهانی نشان دادند که از لحاظ آب و نیتروژن کمبودی نداشتند. دلیل احتمالی برای این مشاهدات، این است که تنش خشکی باعث غلظت بالای کربوهیدرات در ریشه‌ها می‌شود و اثرات بعدی آن در طی آبیاری مجدد به افزایش جذب عناصر غذایی معدنی از جمله نیترات کمک می‌کند. ریشه برای جذب آب و عناصر غذایی به انرژی نیاز دارد. اگر ریشه مقادیر لازم از ترکیبات آلی را بدون کمبود آب در اختیار داشته باشد، جذب عناصر معدنی و نیترات افزایش خواهد یافت (Gao *et al*., 2015). توانایی جذب بالای نیترات در ریشه‌ها می‌تواند شانس ورود نیترات به ریشه‌ها را افزایش دهد. افزایش جذب نیترات منجر به رشد سریعتر و در نهایت تجمع ماده خشک بیشتر در شاخساره می‌گردد.



شکل ۱- سرعت رشد محصول در فاصله زمانی رفع تنش کم‌آبی و ده روز بعد از آن.N1 و N2 مصرف ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار، W1، W2 و W3 به‌ترتیب آبیاری کامل، تنش متوسط و تنش شدید کم‌آبی در مرحله ٤-٦ برگی رشد ذرت. ستون‌های با حروف مشترک بر اساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد اختلاف معنی‌دار ندارند.

Figure 1- Crop growth rate at stress time and 10 days after re-irrigation. N1:100 kg ha^{-1} Nitrogen N2: 200 kg ha^{-1} Nitrogen. W1is complete irrigation, W2 is moderate water stress at V4-6 and W3 is severe water stress at V4-6 growth stage. Column with same letter(s) are not significantly different according to Duncan multiple range test at P≤0.05 probability level.

جدول ۲- خلاصه تجزیه واریانس (میانگین مربعات) سرعت رشد محصول، زوایای ریشه‌های طوقه ای، تعداد ریشه‌های طوقه‌ای، تعداد ریشه‌های جانبی در ریشه‌های طوقه‌ای، زوایای ریشه‌های هوایی، تعداد ریشه‌های هوایی

Table 2- Analysis of variance (mean of squares) of Crop growth rate, Crown root angle, Crown root number, number of lateral root in crown root, brace root angle and brace root number

منابع تغییر Source of variation	درجه آزادی Degree of freedom	سرعت رشد محصول Crop growth rate	زوایای ریشه‌های طوقه‌ای Crown root angle	تعداد ریشه‌های طوقه‌ای Crown root number	تعداد ریشه‌های جانبی ریشه‌های طوقه‌ای Lateral root of crown root	زوایای ریشه‌های هوایی Brace root angle	تعداد ریشه‌های هوایی Brace root number
Block بلوک	2	0.049^ns	13.82^ns	1.43^ns	0.81^ns	6.89^ns	0.49^ns
Nitrogen نیتروژن	1	0.151^ns	842.74**	20.61**	84.42**	932.58**	90.91**
Irrigation آبیاری	5	9.375**	16.36^ns	2.11^ns	0.31^ns	13.97^ns	10.52**
نیتروژن * آبیاری Nitrogen Irrigation*	5	2.349**	17.46^ns	1.27^ns	0.65^ns	5.11^ns	0.37^ns
Error خطا	22	0.14	16.01	1.44	0.67	6.78	0.6
ضریب تغییرات (%) CV		8.2	7.3	9.7	9.2	15.1	5.1

*معنی‌دار در سطح پنج درصد، ** معنی‌دار در سطح یک درصد، ns فاقد اختلاف معنی‌دار

*Significant at P≤ 0.05, **Significant at P≤ 0.01, ns: without significant difference

سایر محققان گزارش دادند تنش خشکی باعث افزایش فعالیت ریشه‌ها شده و این نقش برای مدتی بعد از آبیاری مجدد ادامه می‌یابد (Wang *et al*., 2016). رشد جبرانی بعد از تنش خشکی فرآیند رشدی است که با هورمون‌های گیاهی مختلف تنظیم می‌شود. نیترات مستقیماً باعث تغییرات در مقدار سیتوکینین بسیاری از گیاهان می‌شود (Criado *et al*., 2009). به‌علاوه (Lou *et al*., 2013) گزارش کردند که آبیاری مجدد بعد از خشکی منجر به افزایش غلظت سیتوکینین در نخود و پنبه شد. نتایج سایر محققان نشان می‌دهد که مصرف نیتروژن بعد از تنش کم‌آبی، موجب افزایش محتوای سیتوکینین در برگ‌ها شده و سرعت توزیع آن از ریشه‌ها به برگ‌های ذرت افزایش می‌یابد (Wang *et al*., 2016).

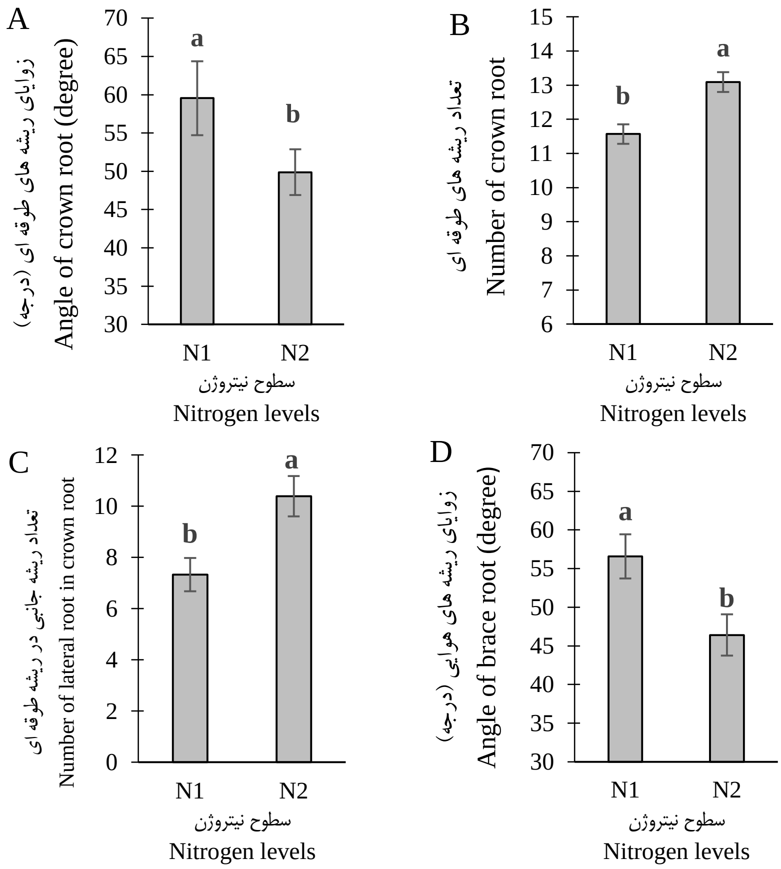
زوایای ریشه‌های طوقه‌ای

سطوح مختلف نیتروژن بر زوایای ریشه‌های طوقه‌ای در سطح یک درصد اثر معنی‌داری داشت (جدول ۲). مصرف ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن موجب شد که زوایای ریشه‌های طوقه‌ای افزایش یابد و نسبت به مصرف ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن، ۹ درجه شیب‌دارتر شوند (شکل ۲). سایر محققین اظهار داشتند در شرایط کمبود نیتروژن زوایای ریشه‌های طوقه‌ای به‌طور متوسط ۱۴ درجه افزایش می‌یابد (Trachsel *et al*., 2011). می‌توان گفت ساختار ریشه مناسب برای اکتساب عناصر غذایی به‌وسیله شرایط محیطی تعیین می‌شود. ساختارهای متفاوت ریشه ممکن است در شرایط محیطی مختلف و عملیات زراعی خاصی مفید باشند. شکل‌گیری ریشه‌های زاویه‌دارتر نه تنها حجم خاکی که مورد جستجو قرار می‌گیرد را افزایش می‌دهد بلکه احتمال آن می‌رود تا آب و عناصر غذایی که که در آب حل می‌شوند و به عمق‌های بیشتر برده می‌شوند را در شرایط خشک بودن خاک سطحی دنبال کند.

با توجه به این‌که تعداد و زوایای ریشه‌های طوقه‌ای تفاوتی با اندازه‌گیری آن‌ها در مرحله ۶ برگی نداشت (داده‌های مرحله ۶ برگی نشان داده نشده) می‌توان گفت که تا حدود روز ۴۵ بعد از کاشت، سیستم ریشه طوقه‌ای از لحاظ تعداد ریشه‌ها و زوایای آن‌ها به توسعه کامل رسیده است. یکسان بودن تعداد و زوایای ریشه‌های طوقه‌ای بعد از ۴۳ روز از کاشت، توسط (Trachsel *et al*., 2013) نیز گزارش شده است. آن‌ها اظهار داشتند که گیاهچه‌ها شرایط عمومی محیط ریشه مثل خصوصیات خاک و دسترسی به عناصر غذایی را توسط سیستم ریشه جنینی خود ارزیابی می‌کنند (ریشه‌های اولیه، ریشه‌های بذری) و برای شرایط محیطی خاص خود را تطبیق می‌دهند. انعطاف‌پذیری (پلاستیسیتی) را می‌توان نتیجه سازگاری تکاملی برای بهینه ساختن جستجو در خاک برای افزایش جذب آب (Kano *et al*., 2011) و عناصر غذایی در شرایط بهینه و شرایط کمبود عناصر غذایی در زمان رقابت‌های درون و بین گونه‌ای در نظر گرفت (Schiffers *et al*., 2011).

تعداد ریشه‌های طوقه‌ای

نیتروژن اثر معنی‌داری در سطح یک درصد بر تعداد ریشه‌های طوقه‌ای داشت (جدول ۲). مصرف ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن باعث شد که تعداد ریشه‌های طوقه‌ای نسبت به مصرف ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن به مقدار ۱۳ درصد افزایش یابد (شکل ۲). کاهش در تعداد ریشه طوقه‌ای توسط سایر محققین (Gaudin *et al*., 2011) در شرایط کمبود نیتروژن در شرایط هواکشت (آئروپونیک) مشاهده شده است.



شکل ۲- مقایسه میانگین اثر سطوح نیتروژن بر زوایای ریشه‌های طوقه‌ای (A)، تعداد ریشه‌های طوقه‌ای (B)، تعداد ریشه جانبی در ریشه طوقه‌ای(C) و زوایای ریشه‌های هوایی (D)؛ N1 و N2 مصرف ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار. ستون‌های با حروف مشترک بر اساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد اختلاف معنی‌دار ندارند.

Figure 2- Mean comparison of Nitrogen level on brace root angle, crown root angle, number of crown root and number of lateral root in crown root. N1:100 kg ha^{-1} nitrogen N2: 200 kg ha^{-1} Nitrogen. Column with same letter(s) are not significantly different according to Duncan multiple range test at P≤0.05 probability level.

تعداد ریشه‌های جانبی ریشه‌های طوقه‌ای

نیتروژن در سطح احتمال یک درصد، اثر معنی‌داری بر تعداد ریشه‌های جانبی در ریشه‌های طوقه‌ای داشت (جدول ۲)، به شکلی که با کاهش مصرف نیتروژن از ۲۰۰ کیلوگرم به ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار، تعداد ریشه‌های جانبی به میزان ۲۸ درصد کاهش نشان داد (شکل ۲). کاهش تعداد ریشه‌های جانبی در واحد طول ریشه می‌تواند نشان‌دهنده تطابق ریشه با مقدار نیتروژن در خاک و مدیریت هدفمند مواد فتوسنتزی و مصرف بهینه آن‌ها باشد. به نحوی که در شرایطی که مقدار نیتروژن در حجم خاک کم است، ریشه گیاه تعداد ریشه جانبی کمتری تشکیل داده تا مواد فتوسنتزی صرف فعالیت‌های دیگری از جمله افزایش طول ریشه‌های محوری گردد، نتایج مشابهی توسط (Gao *et al*., 2015) گزارش شده است.

زوایای ریشه‌های هوایی

نتایج تجزیه واریانس داده‌های زوایای ریشه‌های هوایی (جدول ۲) نشان داد که نیتروژن اثر معنی‌داری بر این صفت در سطح احتمال یک درصد داشت. افزایش مصرف نیتروژن موجب کاهش زوایا به مقدار ۱۰ درجه گردید (شکل ۲). پاسخ قوی‌تر زوایای ریشه‌های هوایی به تغییرات دسترسی به نیتروژن در مقایسه به تغییرات زوایای ریشه‌های طوقه‌ای احتمال دارد که به زمان‌های متفاوت ظهور هر کدام از این دسته از ریشه‌ها مربوط باشد. قبل از ظهور سیستم ریشه‌های طوقه‌ای، بذر و سیستم ریشه جنینی ممکن است به شرایط محیطی پاسخ دهند. نشان داده شده است که بذرها (Finch-Savage and Leubner-Metzger, 2006) و ریشه‌ها تفاوت‌های نیترات عکس‌العمل نشان داده و از راه تغییر در بیان ژن به آن پاسخ می‌دهند (Vidal *et al*., 2010).

تعداد ریشه‌های هوایی

اثر نیتروژن و آبیاری در مورد تعداد ریشه‌های هوایی در سطح یک درصد معنی‌دار گردید (جدول ۲). افزایش مصرف نیتروژن منجر به افزایش ۲۰ درصدی تعداد ریشه‌های هوایی ذرت گردید (جدول ۳). به نظر می‌رسد بهبود شرایط تغذیه‌ای گیاه ذرت باعث افزایش تولید مواد فتوسنتزی و در نتیجه اختصاص مقدار بیشتری از آن‌ها به ریشه‌ها گردیده باشد. در بین سطوح آبیاری، بیشترین تعداد ریشه‌های هوایی به تیمارهای آبیاری کامل (W1)، تنش متوسط (W2) و تنش شدید کم‌آبی در مرحله رویشی (W3) تعلق داشت ضمن این‌که کم‌آبیاری منجر به کاهش تعداد این نوع ریشه‌ها گردید. کمترین مقدار از تیمارهای کم‌آبیاری (W4, W5, W6) به‌دست آمد که حاکی از اهمیت آبیاری در توسعه ریشه‌های هوایی و اثر کم‌آبیاری بعد از مرحله ۶ برگی بر این ریشه‌ها است. کاهش ۱۸ درصدی تعداد ریشه-های هوایی در نتیجه کم‌آبیاری مشاهده شد.

جدول ۳- مقایسه میانگین اثرات اصلی سطوح نیتروژن و آبیاری بر تعداد ریشه هوایی، شاخص کلروفیل (عدد اسپاد)، شاخص سطح برگ در کاکل‌دهی، عملکرد دانه، کارایی زراعی مصرف نیتروژن و کارایی جذب نیتروژن

Table 3- Mean comparison of main effects of Nitrogen and irrigation levels on number of brace roots, chlorophyll meter reading (SPAD), leaf area index at silking, grain yield, agronomic Nitrogen use efficiency, Nitrogen absorption efficiency

		تعداد ریشه هوایی **Number of brace root**	شاخص کلروفیل **Chlorophyll index (SPAD)**	شاخص سطح برگ در کاکل‌دهی **Leaf area index at silking**	عملکرد دانه **Grain yield ($kg.ha^{-1}$)**	کارایی زراعی مصرف نیتروژن **Agronomic Nitrogen use efficiency**	کارایی جذب نیتروژن **Nitrogen absorption efficiency**
Nitrogen	N1	13.58 b	43.32 b	3.46 b	7914 b	39.57 a	44.06 a
نیتروژن	N2	16.76 a	46.06 a	3.76 a	8975 a	29.91 b	33.31 b
Irrigation	W1	16.63 a	47.06 ab	4.26 a	10979 a	44.92 a	47.04 a
آبیاری	W2	16.41 a	46.9 ab	3.61 c	9800 ab	34.21 b	35.97 b
	W3	16.03 a	48.21 a	3.88 ab	8640 b	41.83 a	47.12 a
	W4	14.13 b	42.41 bc	3.24 c	7169 c	29.47 cd	34.67 bc
	W5	14.01 b	42.21 bc	3.49 bc	6369 d	26.73 d	30.81 c
	W6	13.79 b	41.33 c	3.51 c	7647 bc	31.67 bc	36.96 b

در هر ستون و برای هر عامل میانگین‌های با حروف مشترک، بر اساس آزمون چند دامنه دانکن، فاقد تفاوت معنی‌دار هستند. N1 و N2 مصرف ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار، W1 ،W2 و W3 به‌ترتیب آبیاری کامل، تنش متوسط و تنش شدید کم‌آبی در مرحله ۴-۶ برگی. W4 تنش متوسط کم‌آبی در مرحله ۴ تا ۶ برگی و ادامه آبیاری به‌صورت کم‌آبیاری، W5: تنش شدید کم‌آبی در مرحله ۴ تا ۶ برگی و ادامه آبیاری به‌صورت کم‌آبیاری، W6: کم‌آبیاری بعد از مرحله ۶ برگی.

In each column and factor, means with same letters are not significantly different, according to Duncan multiple range test at 5 percent probability level. N1: 100 kg ha^{-1}, N2: 200 kg ha^{-1}. W1: Complete irrigation. W2: Moderate water stress 55% Field capacity at V4-V6 growth stage, W3: Severe water stress 45% at V4-V6 growth stage, W4: Moderate water stress 55% Field capacity at V4-V6 growth stage followed by deficit irrigation (65% field capacity), W5: Severe water stress 45% in V4-V6 growth stage followed by deficit irrigation (65% field capacity), W6: Deficit irrigation (65% field capacity) after V6 growth stage.

شاخص کلروفیل (عدد اسپاد)

نتیجه تجزیه واریانس داده‌های شاخص کلروفیل نشان داد نیتروژن و آبیاری در سطح پنج درصد بر این پارامتر تاثیرگذار بودند (جدول ۴). مصرف نیتروژن به مقدار ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار باعث افزایش هفت درصدی شاخص کلروفیل نسبت به مصرف ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار گردید (جدول ۳). مقادیر شاخص کلروفیل که توسط کلروفیل‌متر دستی ثبت می‌شود تخمینی از مقدار نسبی کلروفیل کل در برگ‌ها است و روند کاهشی آن معیاری از پیری برگ را ارائه می‌کند (Messmer *et al*., 2011). محققان اظهار داشتند که افزایش مصرف کود نیتروژن منجر به افزایش محتوای کلروفیل برگ می‌گردد، ضمن این‌که تاخیر در پیری برگ‌ها و در نهایت افزایش زیست‌توده و عملکرد دانه را در پی دارد (Peng *et al*., 2014). در بین سطوح آبیاری، آبیاری کامل، تنش متوسط و تنش شدید کم‌آبی در مرحله رویشی (W2 و W3) بیشترین مقادیر را به‌خود اختصاص دادند و کمترین مقادیر به کم‌آبیاری (W4,W5,W6) اختصاص داشت (جدول ۲). در نتیجه می‌توان اظهار داشت که تامین آب مورد نیاز گیاه ذرت در زمان کاکل‌دهی منجر به استفاده موثرتر از نیتروژن خاک و ایجاد مقدار بیشتر کلروفیل نسبت به شرایط کم‌آبیاری گردید و کمبود آن موجب کاهش آن شد.

شاخص سطح برگ در کاکل‌دهی

اثر نیتروژن در سطح احتمال پنج درصد و اثر آبیاری در سطح احتمال یک درصد در مورد شاخص سطح برگ معنی‌دار بود (جدول ۴). افزایش مصرف نیتروژن منجر به افزایش هفت درصدی شاخص سطح برگ شد (جدول ۳). آبیاری کامل در بین سطوح آبیاری

بیشترین مقدار را به میزان ۴/۲۶ به‌خود اختصاص داد. کمترین مقدار شاخص سطح برگ هم به تنش متوسط کم‌آبی در مرحله رویشی و ادامه آبیاری به شکل کم‌آبیاری (W4) تعلق داشت (جدول ۳).

عملکرد دانه

نتیجه تجزیه واریانس داده‌های عملکرد دانه نشان داد اثر نیتروژن و آبیاری در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شدند (جدول ۴). مصرف ۲۰۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار باعث افزایش ۱۱ درصدی عملکرد دانه نسبت به مصرف ۱۰۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار گردید (جدول ۳). در بین سطوح آبیاری، بیشترین عملکرد با رفع کامل نیاز آبی گیاه ذرت در آبیاری کامل (W1) حاصل شد و کمترین عملکرد در نتیجه تنش شدید کم‌آبی در مرحله رویشی و کم‌آبیاری متعاقب آن (W5) به‌دست آمد (جدول ۳). در مجموع، بیشترین عملکرد با مصرف ۲۰۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار و آبیاری کامل به مقدار ۱۱۶۴۰ کیلوگرم در هکتار و کمترین عملکرد با مصرف نیتروژن به مقدار ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار و تنش شدید کم‌آبی در مرحله ۴ تا ۶ برگی و کم آبیاری متعاقب آن به مقدار ۶۴۹۰ کیلوگرم در هکتار حاصل شد. افزایش عملکرد در پاسخ به مصرف نیتروژن می تواند به خاطر عوامل مختلفی از جمله سطح برگ وسیع‌تر و سرعت فتوسنتز بالاتر باشد (Peng *et al.*, 2014). در مطالعه مزرعه‌ای که به منظور مقایسه هیبریدهای تجاری ذرت با پتانسیل عملکرد کم و زیاد انجام شد، محققان دریافتند که افزایش عرضه نیتروژن باعث افزایش شاخص سطح برگ، فتوسنتز و فعالیت آنزیم‌های Rubisco و PEP کربوکسیلاز در هر دو نوع هیبرید در مرحله ظهور تاسل و شیری شدن دانه شد (Uribelarrea *et al.*, 2009). در مطالعه (Peng *et al.*, 2014) کاربرد ۳۰۰ کیلوگرم در هکتار به مقدار قابل‌توجهی منجر به افزایش عملکرد دانه ذرت در مقایسه با کاربرد ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار شد و هر دو سطح مصرف نیتروژن عملکرد بالاتری نسبت به تیمار صفر کیلوگرم در هکتار نشان دادند.

جدول ٤- خلاصه تجزیه واریانس (میانگین مربعات) شاخص کلروفیل (اسپاد)، شاخص سطح برگ در کاکل‌دهی، عملکرد دانه، کارایی زراعی مصرف نیتروژن و کارایی جذب نیتروژن

Table 4- Analysis of variance (mean of squares) chlorophyll index (SPAD), leaf area index at silking, grain yield, agronomic Nitrogen use efficiency and Nitrogen absorption efficiency

منابع تغییر Source of variation	درجه آزادی Degree of freedom	شاخص کلروفیل (اسپاد) Chlorophyll index (SPAD)	شاخص سطح برگ در کاکلدهی Leaf area index at silking	عملکرد دانه Grain yield	کارایی زراعی مصرف نیتروژن Agronomic Nitrogen use efficiency	کارایی جذب نیتروژن Nitrogen absorption efficiency
بلوک Block	2	25.75^{ns}	0.22^{ns}	506801.29^{ns}	6.41^{ns}	0.0007^{ns}
نیتروژن Nitrogen	1	67.51*	0.786*	7467740.38**	950.76**	0.117**
آبیاری Irrigation	5	54.62*	0.909**	18787491.27**	306.26**	0.027**
نیتروژن * آبیاری Nitrogen Irrigation*	5	4.59^{ns}	0.28^{ns}	927410.61^{ns}	8.59^{ns}	0.001^{ns}
خطا Error	22	16.6	0.185	752421.3	12.43	0.0015
ضریب تغییرات (%) CV		9.1	11.9	10.3	10.1	10.1

کارایی زراعی مصرف نیتروژن و کارایی جذب نیتروژن

نیتروژن و آبیاری در سطح احتمال یک درصد اثر معنی‌داری بر کارایی زراعی مصرف نیتروژن نشان دادند (جدول ۴). افزایش مصرف نیتروژن منجر به کاهش کارایی زراعی این کود گردید. ذرت در سطح مصرف ۱۰۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار، ۳۹ کیلوگرم دانه به ازای هر کیلوگرم نیتروژن مصرفی تولید کرد، که این مقدار به ۲۹ کیلوگرم در هکتار با مصرف ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن، کاهش یافت (جدول ۳). این نتایج بیانگر آن است که واحدهای اولیه کود مصرفی تاثیر بیشتری روی عملکرد دارند، هر قدر مصرف نیتروژن افزایش یابد، کارایی استفاده از آن کاهش می‌یابد.

محققان گزارش دادند که استفاده از نیتروژن به مقدار ۳۳۰ کیلوگرم در هکتار به مقدار جزئی باعث افزایش عملکرد دانه نسبت به مصرف نیتروژن به مقدار ۱۶۵ کیلوگرم در هکتار شد. در نتیجه کارایی مصرف نیتروژن با مصرف ۳۳۰ نصف تیمار مصرف نیتروژن به مقدار ۱۶۵ کیلوگرم در هکتار بود (Ciampitti and Vyn, 2011). در پژوهش دیگری (Peng *et al.*, 2014) کارایی زراعی مصرف نیتروژن را ۲۶ و ۳۵ کیلوگرم دانه به ازای هر کیلوگرم مصرف نیتروژن به‌ترتیب با تیمار ۳۰۰ و ۱۵۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار گزارش کردند.

در بین سطوح آبیاری، بیشترین کارایی زراعی مصرف نیتروژن با آبیاری کامل به‌دست آمد (۴۵ کیلوگرم در هکتار به ازای یک کیلوگرم

مصرف نیتروژن) و کمترین مقدار از تیمار تنش شدید کم‌آبی در مرحله رویشی و کم آبیاری متعاقب آن (W5) حاصل شد که با تنش متوسط کم‌آبی در مرحله رویشی و ادامه آبیاری به شکل کم‌آبیاری (W4) اختلاف معنی‌داری نداشت (جدول ۳). می‌توان گفت که کارایی زراعی مصرف نیتروژن وقتی به حداکثر می‌رسد که آب کافی برای تعرق و جذب عناصر غذایی از خاک وجود داشته باشد.

نتیجه تجزیه واریانس داده‌های مربوط به کارایی جذب نیتروژن نشان داد که آبیاری و نیتروژن هر دو در سطح احتمال یک درصد بر این شاخص اثر معنی‌داری نشان دادند (جدول ۴). این شاخص با افزایش مصرف نیتروژن از ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار به ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار به میزان ۲۵ درصد کاهش نشان داد (جدول ۳). این داده‌ها حکایت از آن دارد که بیش از نیمی از نیتروژن از دسترس گیاه خارج می‌شود و به‌صورت آبشویی به اعماق رفته و یا در خاک باقی می‌ماند. در بین سطوح آبیاری، بیشترین کارایی جذب نیتروژن با آبیاری کامل (W1) به‌دست آمد و کمترین مربوط به تنش شدید کم‌آبی در مرحله رویشی و ادامه آبیاری با کم‌آبیاری (W5) بود (جدول ۳).

روابط همبستگی

روابط همبستگی صفات و شاخص‌های مورد مطالعه در جدول ۵ ارائه شده است. عملکرد دانه بیشترین همبستگی را با شاخص سطح برگ در کاکل‌دهی داشت به این معنی که هرچه سطح دریافت‌کننده نور افزایش یابد منجر به عملکرد بیشتری می‌گردد ضمن این‌که شاخص کلروفیل به‌عنوان معیاری از سبز بودن و تراکم کلروفیل در برگ‌ها رابطه مثبت و معنی‌داری با عملکرد (r=0.47**) نشان داد. انتظار می‌رود هرچه تراکم کلروفیل در برگ‌ها بیشتر باشد، مقدار تولید مواد فتوسنتزی و انتقال آن‌ها به اندام هدف بیشتر شده و در نهایت عملکرد بیشتری تولید شود. محققان اظهار داشتند که افزایش مصرف کود نیتروژن منجر به افزایش بیوماس و عملکرد دانه می‌شود و این اثر در نتیجه تاخیر در پیری برگ‌ها به خاطر افزایش محتوای کلروفیل برگ است (Peng *et al.*, 2014). تعداد ریشه‌های هوایی رابطه مثبت و معنی‌داری (r=0.61**) با عملکرد نشان داد، به این معنی که با بهتر شدن وضعیت تغذیه‌ای و آبیاری گیاه علاوه بر تولید دانه بیشتر تعداد بیشتری ریشه هوایی ایجاد می‌شود. با این حال، گزارش شده است که در شرایط عدم تنش، تعداد ریشه‌های هوایی رابطه منفی (r=-0.69**) با عملکرد دانه نشان دادند (Trachsel *et al.*, 2013). یکسان نبودن نتایج ممکن است به این خاطر باشد که ایجاد ریشه‌های هوایی با بلال برای مواد فتوسنتزی رقابت می‌کنند و ازدیاد این ریشه‌ها باعث کاهش عملکرد می‌گردد. رابطه منفی و معنی‌دار بین تعداد ریشه های طوقه‌ای و زوایای این دسته از ریشه‌ها مشاهده شد به این معنی که هرچه زوایا شیب‌دارتر شدند، تعداد ریشه‌های طوقه‌ای کم شد. رابطه منفی و معنی‌داری بین زوایای ریشه‌های طوقه‌ای و تعداد ریشه‌های جانبی نیز دیده شد. کارایی جذب نیتروژن رابطه مثبت و معنی‌داری با زوایای ریشه‌های طوقه‌ای (r=0.41**) و زوایای ریشه‌های هوایی (r=0.40**) نشان داد.

این رابطه را می‌توان این‌گونه تفسیر کرد که تغییر زوایا منجر به جذب بیشتر نیتروژن از خاک می‌گردد و راهکار موثری در شرایط کمبود نیتروژن در خاک است. این شاخص رابطه منفی و معنی‌داری با تعداد ریشه‌های جانبی در ریشه های طوقه‌ای داشت. کارایی زراعی مصرف نیتروژن رابطه مثبتی با زوایای ریشه‌های طوقه‌ای (r=0.41**) نشان داد. ضمن این‌که رابطه منفی با تعداد ریشه‌های جانبی در ریشه‌های طوقه‌ای (r=0.42**) مشاهده شد. افزایش زوایا می‌تواند باعث شود که ریشه در عمق بیشتری از خاک توسعه یابد و همچنان که نیتروژن با آبشویی به اعماق حرکت می‌کند، ریشه فرصت بیشتری برای جذب آن داشته باشد.

نتیجه‌گیری

به‌طور کلی نتایج این پژوهش نشان داد سرعت رشد محصول گیاهانی که دچار کمبود نیتروژن و تنش شدید کم‌آبی بودند، پس از آبیاری مجدد، به گیاهان شاهد نزدیک شد. نیتروژن بر زوایای ریشه‌های طوقه‌ای اثرگذار بود و در نتیجه کمبود نیتروژن در این آزمایش زوایای ریشه‌های طوقه‌ای نُه درجه افزایش یافت که می‌تواند به معنی عمیق‌تر شدن ریشه و جذب آب و عناصر غذایی از عمق بیشتر خاک باشد. با این حال تعداد ریشه‌های طوقه‌ای در نتیجه کمبود نیتروژن در این آزمایش کاهش نشان داد. تعداد ریشه‌های جانبی در ریشه‌های طوقه‌ای با کاهش مصرف نیتروژن از ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار به ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار، به مقدار ۲۸ درصد کم شد. در مورد ریشه‌های هوایی ذرت، مصرف نیتروژن به میزان ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار موجب شد تا زاویه این ریشه‌ها به مقدار ۱۰ درجه نسبت به مصرف نیتروژن به مقدار ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار کاهش یابد اما تعداد آن‌ها ۲۰ درصد افزایش یافت. در شرایط این آزمایش کم‌آبیاری بعد از مرحله شش برگی ذرت باعث کاهش ۱۸ درصدی تعداد ریشه‌های هوایی شد. شاخص کلروفیل در مرحله کاکل‌دهی در نتیجه کاهش مصرف نیتروژن و کم‌آبیاری بعد از شش برگی به‌ترتیب هفت و ۱۱ درصد کاهش نشان داد. مصرف نیتروژن به مقدار ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار نسبت به ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار افزایش هفت درصدی شاخص سطح برگ در کاکل‌دهی را موجب گردید و همراه شدن تنش شدید کم‌آبی در مرحله چهار تا شش برگی با کم‌آبیاری متعاقب آن، کاهش ۲۶ درصدی آن را نسبت به آبیاری کامل باعث شد. بیشترین عملکرد با مصرف نیتروژن به مقدار ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار و آبیاری کامل به مقدار ۱۱۶۴۰ کیلوگرم در هکتار بـدست آمد و کاهش ۴۰ درصدی عملکرد با مصرف نیتروژن به مقدار ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار و تنش شدید کم‌آبی در مرحله چهار تا شش برگی

ذرت و کم‌آبیاری متعاقب آن ثبت شد که در نتیجه کاهش شاخص سطح برگ و شاخص کلروفیل بود. مصرف نیتروژن به مقدار ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار افزایش زاویه ریشه‌های طوقه‌ای و هوایی و کاهش تعداد آنها را نسبت به مصرف نیتروژن به مقدار ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار باعث شد، این تغییرات در ریشه‌ها مانع کاهش عملکرد ناشی از کمبود نیتروژن نگردید و در نهایت عملکرد دانه کاهش ۱۲ درصدی نشان داد. رشد جبرانی بوته‌های ذرت این امکان را فراهم می‌سازد تا در دوره بعد از استقرار گیاه (۴ تا ۶ برگی) از تنش کم‌آبی به منظور صرفه‌جویی در مصرف آب سود برد، ضمن این‌که توجه به ریشه‌های گیاه ذرت در برنامه‌های اصلاحی می‌تواند در بهبود کارایی مصرف نیتروژن راهگشا باشد.

جدول ۵- ضرایب همبستگی صفات و شاخص های مورد مطالعه
Table 5- Correlation coefficient of characters and indices

	عملکرد Yield	ریشه‌های جانبی در ریشه طوقه‌ای Lateral root of crown root	تعداد ریشه‌های طوقه‌ای Number of crown root	زوایای ریشه‌های طوقه‌ای Angles of crown root	زوایای ریشه‌های هوایی Angles of brace root	تعداد ریشه‌های هوایی Numbers of brace root	شاخص سطح برگ در کاکل‌دهی Leaf area index at silking	شاخص کلروفیل (اسپاد) کاکل-دهی SPAD at silking	کارایی جذب نیتروژن Nitrogen absorption efficiency	کارایی زراعی مصرف نیتروژن Agronomic Nitrogen use efficiency
عملکرد	1									
ریشه‌های جانبی ریشه طوقه‌ای	0.17 ns	1								
تعداد ریشه‌های طوقه‌ای	0.28 ns	0.47**	1							
زوایای ریشه‌های طوقه‌ای	-0.16ns	-0.70**	-0.25ns	1						
زوایای ریشه‌های هوایی	-0.38*	-0.82**	-0.52**	0.73**	1					
تعداد ریشه‌های هوایی	0.60**	0.76**	0.65**	-0.54**	-0.79**	1				
شاخص سطح برگ در کاکل‌دهی	0.63**	0.14ns	0.15ns	-0.22 ns	-0.38*	0.38*	1			
شاخص کلروفیل (اسپاد) در کاکل‌دهی	0.47**	0.36*	0.42*	-0.20ns	-0.40*	0.54**	0.33*	1		
کارایی جذب نیتروژن	0.43**	-0.46**	-0.19ns	0.41*	0.40*	-0.18ns	0.25ns	0.30ns	1	
کارایی زراعی مصرف نیتروژن	0.51**	-0.42*	-0.09ns	0.41*	0.35*	-0.06ns	0.31*	0.36*	0.97**	1

*معنی‌دار در سطح پنج درصد، ** معنی‌دار در سطح یک درصد، ns فاقد اختلاف معنی‌دار
*Significant at $P\leq 0.05$, **Significant at $P\leq 0.01$, ns: without significant difference

References

1. Ballester, C., Castel, J., Intrigliolo, D. S., and Castel, J. R. 2013. Response of Navel Lane Late citrus trees to regulated deficit irrigation: yield components and fruit composition. Irrigation Science 31: 333-341.
2. Benjamin, J. G., Nielsen, D. C., Vigil, M. F., Mikha, M. M., and Calderon, F. 2014. Water deficit stress effects on corn (*Zea mays* L.) root: shoot ratio. Open Journal of Soil Science 4: 151-160.
3. Bänziger, M., Edmeades, G. O., Beck, D., and Bellon, M. 2000. Breeding for Drought and Nitrogen Stress Tolerance in Maize: From Theory to Practice. Mexico, D.F. CIMMYT.PP.68.
4. Cheng, L. L., and Fuchigami, L. H. 2000. Rubisco activation state decreases with increasing nitrogen content in apple leaves. Experimental Botany 51: 1687-1694.
5. Ciampitti, I. A., and Vyn, T. J. 2011. A comprehensive study of plant density consequences on nitrogen uptake dynamics of maize plants from vegetative to reproductive stages. Field Crops Research 121: 2-18.
6. Criado, M. V., Caputo, C., Roberts, I. N., Castro, M. A., and Barneix, A. J. 2009. Cytokinin-induced changes of Nitrogen remobilization and chloroplast ultrastructure in wheat (*Triticum aestivum*). Journal of Plant Physiology 166: 1775-1785.
7. Delogu, G., Cativelli, L., Pecchioni, N., De Flacis, D., Maggiore, T., and Stanca, A. M. 1998. Uptake and agronomic efficiency of nitrogen in winter barley and winter wheat. European Journal of Agronomy 9: 11-20.

8. Feil, B., Moser, S. B., Jampatong, S., and Stamp, P. 2005. Mineral composition of the grain of tropical maize varieties as affected by pre-anthesis drought and rate of nitrogen fertilization. Crop Science 45: 516-523.
9. Fereres, E., and Soriano, M. A. 2007. Deficit irrigation for reducing agricultural water use. Journal of Experimental Botany 2: 147-159.
10. Finch-Savage, W. E., and Leubner-Metzger, G. 2006. Seed dormancy and the control of germination. New Phytology 171: 501-523.
11. Jensen, C. R., Orum, J. E., Pedersen, S. M., Andersen, M. N., Plauborg, F., Liu, F., and Jacobsen, S. E. 2014. A short overview of measures for securing water resources for irrigated crop production. Journal of Agronomy and Crop Science 200: 33-343.
12. Intrigliolo, D. S., Bonet, L., Nortes, P. A., Puerto, H., Nicolas, E., and Bartual, J. 2013. Pomegranate trees performance under sustained and regulated deficit irrigation. Irrigation Science 31: 959-970.
13. Gao, K., Chen, F., Yuan, L., Zhang, F., and Mi, G. 2015. A comprehensive analysis of root morphological changes and nitrogen allocation in maize in response to low-nitrogen stress. Plant Cell Environment 38: 740-750.
14. Gaudin, A. C. M., McClymont, S. A., Holmes, B. M., Lyons, E., and Raizada, M. N. 2011. Novel temporal, fine-scale and growth variation phenotypes in roots of adult-stage maize (*Zea mays* L.) in response to low nitrogen stress. Plant Cell Environment 34: 2122-2137.
15. Hochholdinger, F., and Tuberosa, R. 2009. Genetic and genomic dissection of maize root development and architecture. Current Opinion in Plant Biology 12: 172-177.
16. Kano, M., Inukai, Y., Kitano, H., and Yamauchi, A. 2011. Root plasticity as the key root trait for adaptation to various intensities of drought stress in rice. Plant Soil 342: 117-128.
17. Koocheki, A., and Sarmadnia, G. H. 1998. Physiology of Crop Plants (translated). Jahad Daneshgahi Mashhad press, Mashhad, Iran. 400 p. (in Persian).
18. Luo, H. H., Han, H. Y., Zhang, Y. L., and Zhnag, W. F. 2013. Effects of drought and re-watering on endogenous hormone contents of cotton roots and leaves under drip irrigation with mulch. Chinese Journal of Applied Ecology 24: 1009-1016. (in Chinese with English abstract).
19. Liao, H., Rubio, G., Yan, X. L., Cao, A. Q., Brown, K. M., and Lynch, J. P. 2001. Effect of phosphorus availability on basal root shallowness in common bean. Plant Soil 232: 69-79.
20. Mansouri-Far, S., Modares Sanavy, S. A. M., and Mohammadi, Kh. 2010. Effect of water deficit stress and Nitrogen on yield and compatibility metaabolites of two medium maturity corn cultivars. Journal of soil and water science 20: 29-45. (in Persian with English abstract).
21. Messmer, R., Frasheboud, Y., Banziger, M., Stamp, P., and Ribaut, J. M. 2011. Drought stress and tropical maize: QTLs for leaf greenness, plant senescence, and root capacitance. Field Crops Research 124: 93-103.
22. Moll, R. H., Kamprath, E. J., and Jackson, W. A. 1982. Analysis and interpretation of factors which contribute to efficiency of nitrogen utilization. Agronomy Journal 74: 562-564.
23. Nagel, K. A., Kastenholz, B., Jahnke, S., Van Dusschoten, D., Aach, T., Muhlich, M., Truhn, D., Scharr, H., Terjung, S., Walter, A., and Schurr, U. 2009. Temperature responses of roots: impact on growth, root system architecture and implications for phenotyping. Functional Plant Biology 36: 947-959.
24. Osborne, S. L., Scheppers, J. S., Francis, D. D., and Schlemmer, M. R. 2002. Use of spectral radiance to in -season biomass and grain yield in nitrogen and water- stressed corn. Crop Science 42:165-171.
25. Pandey, R. K., Maranville, J. W., and Chetima, M. M. 2000. Deficit irrigation and nitrogen effects on maize in a Sahelian environment II. Shoot growth, nitrogen uptake and water extraction. Agricultural Water Management 46: 15-27.
26. Peng, Y., Li, C., and Fritschi, F. B. 2014. Diurnal dynamics of maize leaf photosynthesis and carbohydrate concentrations in response to differential Nitrogen availability. Environmental and Experimental Botany 99: 18-27.
27. Rabbani, J., and Emam, Y. 2011. Yield response of maize hybrids to drought stress at different growth stages. Journal of Crop Production and Processing 2: 65-79. (in Persian with English abstract).
28. Schiffers, K., Tielborger, K., Tietjen, B., and Jeltsch, F. 2011. Root plasticity buffers competition among plants: theory meets experimental. Ecology 92: 610-620.
29. Trachsel, S., Kaeppler, S. M., Brown, K. M., and Lynch, J. P. 2011. Shovelomics: high throughput phenotyping of maize (*Zea mays* L.) root architecture in the field. Plant Soil 341: 75-87.
30. Trachsel, S., Kaeppler, S. M., Brown, K. M., and Lynch, J. P. 2013. Maize root growth angles become steeper under low N conditions. Field Crops Research 140: 18-31.
31. Uhart, S. A., and Andrade, F. H. 1995. Nitrogen deficiency in maize: I. Effects on crop growth, development, dry matter partitioning, and kernel set. Crop Science 35: 1376-1383.
32. Uribelarrea, M., Moose, S. P., and Below, F. E. 2007. Divergent selection for grain protein affects nitrogen use in maize hybrids. Field Crops Research 100: 82-90.
33. Uribelarrea, M., Crafts-Brandner, S. J., and Below, F. E. 2009. Physiological N response of field-grown maize hybrids (*Zea mays* L.) with divergent yield potential and grain protein concentration. Plant and Soil 316: 151-160.

34. Vidal, E. A., Tamayo, K. P., and Gutierrez, R. A. 2010. Gene networks for nitrogen sensing, signaling, and response in Arabidopsis thaliana. Wiley Interdisciplinary Review 2: 683-693.
35. Wang, X., Wang, J., Sun, R., Hou, X., Zhao, W., Shi, J., Zhang, Y., Qi, L., Li, X., Dong, P., Zhang, L., Xu, G., and Gan, H.. 2016. Correlation of the corn compensatory growth mechanism after post-drought rewatering with cytokinin induced by root nitrate absorption. Agricultural Water Management 166: 77-85.
36. Wu, Y. J., and Cosgrove, D. J. 2000. Adaptation of root to low water potentials by changes in cell wall extensibility and cell wall proteins. Journal of Experimental Botany 51: 1543-1553.
37. Zhu, J., Brown, K.M., and Lynch, J. P. 2010. Root cortical aerenchyma improves the drought tolerance of maize (*Zea mays* L.). Plant, Cell and Environment 33: 740-749.

Iranian Journal of Field Crops Research
Vol. 18, No. 2, Summer. 2020, p. 139-151

نشریه پژوهشهای زراعی ایران
جلد ۱۸، شماره ۲، تابستان ۱۳۹۹، ص. ۱۵۱-۱۳۹

Effect of Nitrogen and Water Deficit Stress on Corn (*Zea mays* L.) Root Characters and Grain Yield

R. Sarwarzadeh[1], H. R. Khazaei[2*], A. Nezami[2]

Received: 26-11-2017
Accepted: 25-04-2018

Introduction

In recent years regulated deficit irrigation as a part of conservation and saving practices in water consumption has received attention. Vegetative growth stage of corn has a relative tolerance to water deficit stress. Therefore, yield loss is negligible. Nitrogen shortage stress leads to decrease in leaf area, leaf senescence and reduction of photosynthesis as a result of decrease in chlorophyll content. Roots play an important role in soil searching for water and nutrients. Root ability to change soil biochemical and physiological processes consider as a remarkable mechanism to tolerate environmental stress. Considering the role of nitrogen in corn production and irrigation in summer crops, understanding the response of corn to water stress and nitrogen consumption level are important. Furthermore, corn growth recovery after water deficit stress is critical for better understanding of water saving techniques. This study designed to determine morphological change in root of corn and their effect on corn yield under different irrigation and nitrogen levels.

Materials and Methods

In order to evaluate the impact of different levels of nitrogen consumption and water deficit stress on corn (SC 704) in field condition, an experiment conducted during 2015 in the experimental field of Ferdowsi University of Mashhad. Nitrogen levels were, including 100 and 200 kg ha^{-1}and irrigation applied in 6 levels, including W1: complete irrigation, W2: moderate water stress (55% of field capacity) at V4-V6 growth stage, W3: severe water stress (45% of field capacity) at V4-V6 growth stage, W4: moderate water stress (55% of field capacity) at V4-V6 growth stage followed by deficit irrigation (65% of field capacity), W5: severe water stress (45% of field capacity) in V4-V6 growth stage followed by deficit irrigation (65% of field capacity), W6: deficit irrigation (65% of field capacity) after V6 growth stage. Effect of water deficit stress and re-watering concurrently with two levels of nitrogen consumption attested by crop growth rate index between stress time and 10 days after rewatering. Furthermore at silking stage, SPAD, leaf area index, the number and angle of crown and brace roots, grain yield, agronomic nitrogen use efficiency, nitrogen uptake efficiency and nitrogen harvest index measured and calculated.

Results and Discussion

Result showed that under severe water stress re-watering at the same time with applying nitrogen led to faster growth. Effects of nitrogen and irrigation were significant on SPAD, leaf area index, the number of brace roots, grain yield, agronomic use efficiency and nitrogen uptake efficiency in 5% probability level, while effect of nitrogen on number of crown root, angle of crown root and number of lateral root in crown root were significant at 5% probability level ($p\text{-}value < 0.05$). Grain yield had a significant and positive correlation with leaf area index, the number of brace roots and SPAD, whereas yield had a negative correlation with brace root angle. Despite highest yield obtained under the consumption of 200 kg ha^{-1} nitrogen with complete irrigation, yield reduction due to water deficit at V4-V6 growth stage was 6% which shows the relative tolerance of corn to water deficit stress during aforementioned growth stage and effective tolerance of root and shoot of corn for minimizing the consequences of water stress on our experiment condition.

Conclusions

Although highest grain yield obtained with consumption of 200 kg ha^{-1} nitrogen with complete irrigation, flexible management with considering availability of water and nitrogen during vegetative growth stage lead to maximum profitability. Relative tolerance of corn seedling to water deficit stress and growth recovery of crop makes it possible to save water. Flexibility of corn root number and angle can be used in breeding program to obtain hybrids with more effective nitrogen use efficiency.

Keywords: Agronomic nitrogen use efficiency, Brace root angle, Crown root angle

1- Ph.D. student, Department of Agrotechnolgy, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Iran
2- Professor, Department of Agrotechnolgy, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Iran
(*- Corresponding Author Email: h.khazaie@um.ac.ir)